

Evaluation de paramètres thermosensibles basés sur la mesure de la tension directe pour une utilisation dans des conditions d'usage

Laurent DUPONT¹, Yvan AVENAS²

¹) IFSTTAR, LTN, 25 allée des Marronniers, F-78000 Versailles, France, laurent.dupont@ifsttar.fr

²) Université de Grenoble, G2Elab – BP46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France, yvan.avenas@grenoble-inp.fr

RESUME – La température des composants à semi-conducteurs est l'un des principaux facteurs qui affectent les performances et la fiabilité des convertisseurs de puissance. L'estimation de cette température est aujourd'hui principalement réalisée grâce à des paramètres électriques thermosensibles, mais ces derniers sont encore peu ou pas adaptés aux conditions fonctionnelles des convertisseurs. Cet article présente l'évaluation de nouveaux indicateurs, basés sur des mesures de la tension directe des composants, permettant une mesure indirecte de la température durant le fonctionnement d'un convertisseur de puissance. Les résultats obtenus apportent une information complémentaire sur la robustesse de ces indicateurs par rapport à certains mécanismes d'endommagement dus au vieillissement des modules de puissance.

MOTS-CLES – Température, Composant de puissance, Paramètre électrique thermosensible (PETS), Vieillessement, Caractérisation.

1. Introduction

La température de jonction est un paramètre qui affecte fortement les performances électriques et la durée de vie des modules à semi-conducteurs de puissance. L'estimation de cette température est essentielle pour évaluer notamment leurs performances thermiques, mais aussi pour quantifier les contraintes et les niveaux des endommagements révélés lors de vieillissements accélérés conduits en laboratoire [1, 2]. Toutefois, les moyens permettant d'accéder à cette grandeur restent relativement restreints en raison de l'environnement contraignant en partie lié à une forte intégration fonctionnelle. Cependant, différentes solutions permettent de répondre à cette attente [3].

Ainsi, des fabricants proposent des solutions avec un capteur de température reporté au sein du module de puissance. Avec l'aide d'un modèle thermique précis, il est ainsi possible d'évaluer les températures des parties actives situées dans l'environnement proche de ce capteur. Toutefois, les modèles d'intégration des fonctions de conversion de puissance sont de plus en plus complexes. De plus, les performances thermiques d'un système de conversion d'énergie (convertisseur, système de refroidissement...) ne sont pas stables tout au long de la vie du système. Ce facteur conduit alors à une divergence du modèle initial qui peut être difficile à corriger [4]. D'autres approches proposent d'intégrer un capteur thermosensible dans le composant semi-conducteur [5]. Au-delà de la spécificité de ces puces instrumentées, nécessairement plus coûteuses, l'information recueillie est une donnée locale qui ne peut rendre compte à elle seule de la réelle contrainte thermique. En effet, la topologie d'intégration et les fortes densités de puissance mises en jeu renforcent la distribution intrinsèquement inhomogène de la température au sein d'un composant de puissance [6].

Enfin, de façon plus largement répandue, l'usage des caractéristiques électriques thermosensibles des composants de puissance permet d'acquérir une information sur la température des parties actives. Sans détailler l'ensemble des Paramètres Electriques ThermoSensibles (PETS), cette solution repose sur une campagne de calibration du paramètre thermosensible pour obtenir une mesure électrique représentative de la température du composant. Il est possible de classer les paramètres électriques thermosensibles en deux grandes familles. La première famille regroupe ceux qui sont exploitables dans des conditions éloignées des conditions réelles d'usage des composants dans un convertisseur (i.e. hors-ligne). Ces PETS hors-ligne sont principalement utilisés en laboratoire pour évaluer les performances thermiques des modules de puissance ainsi que pour le contrôle des contraintes appliquées et la surveillance des modes d'endommagement lors de campagnes de vieillissement accélérés. Dans certains cas, les PETS hors-ligne peuvent néanmoins être intégrés dans des convertisseurs fonctionnels sous réserve de définir des instants où la configuration du

convertisseur permet de se rapprocher des conditions de la calibration [7]. La deuxième famille comprend les PETS pouvant être exploités dans les conditions opérationnelles des convertisseurs de puissance (i.e. en-ligne). Cette solution fait l'objet de nombreuses recherches afin de répondre aux besoins de nouveaux indicateurs permettant de renforcer principalement trois axes de recherches intimement liés. Le premier axe porte sur l'évaluation en laboratoire des modes et mécanismes physiques d'endommagement des composants de puissance soumis à des contraintes représentatives de l'usage. Le second axe propose d'informer le système sur des événements erratiques qui entraîneraient le module de puissance à devoir fonctionner dans des conditions trop sévères vis-à-vis de son dimensionnement. Enfin, le dernier axe porte sur le diagnostic des modules à semi-conducteur de puissance afin de satisfaire un besoin grandissant de disponibilité du système.

Au regard de ce contexte, les solutions actuellement disponibles ne sont pas encore totalement satisfaisantes au regard des attentes. Cet article présentera les résultats issus de l'évaluation de nouveaux indicateurs électriques de la température des composants silicium (diode et IGBT). Ces PETS sont basés sur la mesure de la tension directe afin de s'affranchir du besoin de capteurs spécifiques. De plus, ils semblent être adaptés à des conditions opérationnelles ce qui limite le risque de dégradation des performances du convertisseur. Une première partie sera consacrée à la méthodologie permettant de quantifier la représentativité, la sensibilité et la généralité de ces PETS. Le banc de caractérisation électrique sera présenté en détaillant l'utilisation de la caméra infrarouge pour contrôler la température des composants. Mais, d'autres facteurs seront pris en compte dans la perspective d'une mesure de la température lors du fonctionnement d'un convertisseur. Ainsi, devant les contraintes de robustesse de ces indicateurs vis-à-vis de l'endommagement, une étude complémentaire permettra d'évaluer leurs comportements face à certains des principaux mécanismes d'endommagements.

2. Evaluation des indicateurs électriques thermosensibles

2.1 Présentation de la méthodologie et des moyens

La campagne de caractérisation des paramètres électriques thermosensibles est réalisée avec l'aide d'un banc permettant de contrôler les sollicitations électriques appliquées au composant sous test. Durant les phases préliminaires de calibration du paramètre, l'excitation électrique est de courte durée afin de limiter les phénomènes d'auto échauffement de la partie active. Les conditions thermiques sont imposées par un système de thermorégulation qui alimente en fluide une boîte à eau sur laquelle le composant est reporté via une interface thermique adaptée. Les mesures des grandeurs électriques sont réalisées avec un système d'acquisition et de contrôle permettant de satisfaire les besoins de synchronisation, de vitesse d'échantillonnage et d'incertitude de mesure (figure 1).

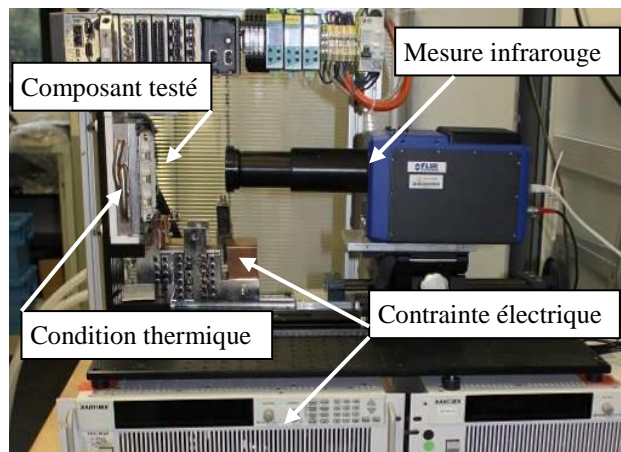


Figure 1 : Banc de caractérisation électrothermique permettant de qualifier les PETS.

Afin de vérifier la pertinence des mesures obtenues avec les PETS, la mesure de la température de la surface active est réalisée à l'aide d'une caméra infrarouge (FLIR SC6800). C'est la raison pour laquelle une couche maîtrisée de peinture haute température (PYROMARK 1200) est déposée par micro pulvérisation sur la partie active afin de satisfaire le besoin d'une émissivité élevée en surface du composant. L'émissivité de cette peinture a été caractérisée pour des épaisseurs de 10 μ m et 45 μ m et pour des températures comprises entre 23°C et 200°C. Les résultats ont ainsi permis de confirmer le comportement opaque de ce dépôt et la stabilité des caractéristiques dans la gamme de longueurs d'onde comprise entre 2 μ m et 10 μ m (figure 2).

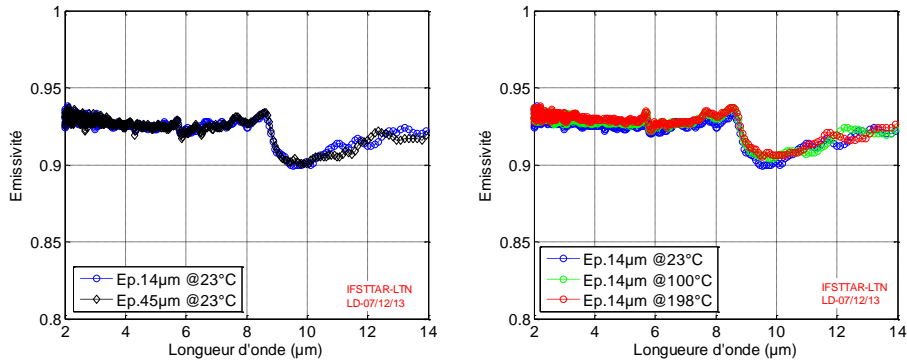


Figure 2 : Caractérisation de l'émissivité de la peinture PYROMARK 1200 en fonction de son épaisseur et de la température.

2.2 Résultats issus de la calibration des PETS

Deux types de PETS sont essentiellement étudiés pour effectuer des mesures de température indirectes lors du fonctionnement du convertisseur [8] :

- la variation des grandeurs temporelles lors des commutations (délais, temps de montée ou de descente...)
- la variation de la tension directe.

Dans le premier cas, la mesure du PETS est difficile en raison de sa très faible sensibilité (au maximum quelques ns/°C pour les mesures de temps) et de sa dépendance à de nombreux facteurs extérieurs comme la tension de commande et les différents paramètres de la maille de commutation. Pour le deuxième cas, il a été montré que l'un des principaux défauts de cette méthode est la forte dépendance de la mesure avec les mécanismes d'endommagement conduisant notamment à une augmentation de la résistance électrique (levé de fil de bonding par exemple).

Nous avons toutefois axé notre recherche sur ce dernier type d'indicateur en raison d'une relative facilité de mise en œuvre pour la majorité des composants avec des niveaux de sensibilité acceptables. Ainsi, la méthode identifiée doit permettre de s'affranchir au maximum des effets ohmiques liés aux liaisons électriques du composant, tels que les fils et la métallisation. Afin de faciliter leur utilisation, il est important que ces nouveaux indicateurs ne nécessitent pas l'utilisation d'un capteur spécifique et n'affectent pas les performances du convertisseur. Ainsi, les PETS qui seront présentés dans l'article final sont basés sur l'extraction de grandeurs obtenues à partir de l'interpolation des mesures de la chute de tension directe, du courant et de la tension de commande (si nécessaire). La figure 3 détaille les résultats de la calibration des deux PETS évalués ici pour un transistor IGBT³ 600V-200A (INFINEON SIGC100T60R3). Le principe du premier paramètre ΔV_{CE_AVGE} est d'exploiter la variation de la chute de tension directe obtenue pour deux niveaux de tension de commande V_{GS} à un même niveau de courant (Figure 3a). Le second PETS identifié est la variation de la chute de tension directe à zéro de courant ΔV_{CE0} calculée à partir des chutes de tension directe mesurées pour plusieurs niveaux de courant (Figure 3b).

L'article final présentera une étude détaillée de ces deux paramètres électriques thermosensibles à travers une discussion qui détaillera leurs performances telles que la sensibilité, la robustesse aux conditions de calibration, et la généricité rapportée à l'effet de la dispersion des caractéristiques des composants.

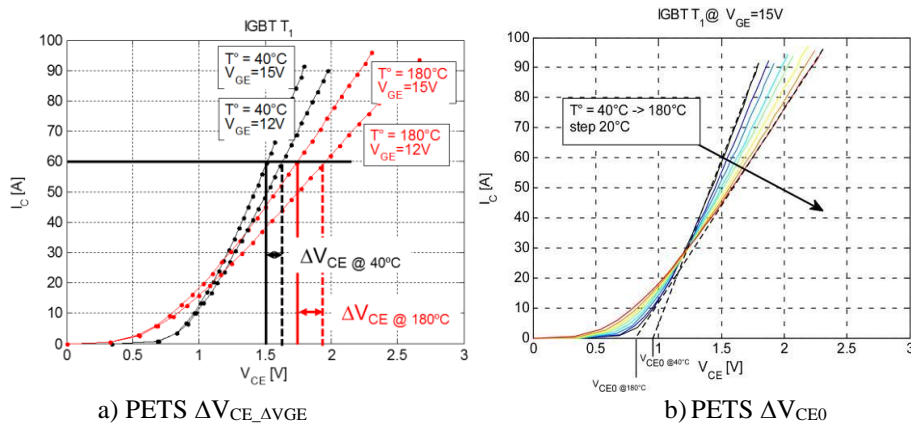


Figure 3 : Méthode d'extraction des PETS à partir des caractéristiques $I(V, V_{GE})$ d'un transistor IGBT³ 600V-200A INFINEON.

3. Evaluation des PETS dans des conditions d'usage

Ce paragraphe présentera en détail les campagnes expérimentales réalisées afin d'évaluer les performances des PETS préalablement calibrés dans des conditions d'usage. La discussion portera notamment sur la comparaison entre la température obtenue avec les PETS et celle mesurée en surface du composant grâce à la caméra infrarouge. L'estimation de la température de référence du composant est obtenue avec l'aide d'un moyen de traitement numérique des mesures réalisées avec la caméra infrarouge [9]. Une partie de cette discussion abordera notamment la sensibilité des PETS face à la dégradation des liaisons électriques. Ce dernier point cherche à quantifier la robustesse des PETS dans le cas de dégradations qui affectent la réponse électrothermique des composants à semi-conducteur. A titre d'exemple, la figure 4 montre des mesures infrarouges réalisées pour évaluer la pertinence d'une estimation indirecte de la température d'un IGBT sous l'influence de dégradations apportées aux liaisons électriques lors d'un fonctionnement en conduction. L'intérêt des nouveaux paramètres thermosensibles sera démontré notamment en comparant les résultats avec ceux issus d'une mesure de la chute de tension V_{CE} bien trop dépendante de l'endommagement.

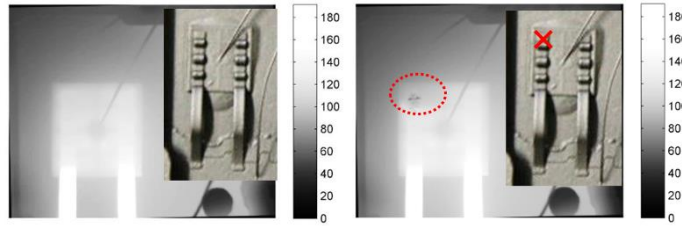


Figure 4 : Evaluation des performances des PETS à l'équilibre thermique lors de l'injection d'un courant de 100A.

4. Conclusion

Ces travaux, initialement supportés par le GdR SEEDS, ont permis de définir une méthodologie et des moyens expérimentaux permettant d'évaluer de nouveaux paramètres électriques thermosensibles. Des PETS qui semblent adaptés à la mesure indirecte de la température des composants de puissance dans des conditions fonctionnelles ont été identifiés. Cet article présentera les principales caractéristiques de ces nouveaux PETS en détaillant leur représentativité et les limites de leur domaine de validité. Enfin, une étude détaillera leurs performances et leurs robustesses dans des conditions d'usage en prenant en compte les risques de dérive induits par le vieillissement des constituants qui composent un module de puissance.

5. Références

- [1] M. Ciappa, « Selected failure mechanisms of modern power modules », *Microelectronics Reliability*, vol. 42, no. 4-5, pp. 653-667, Apr-May 2002.
- [2] M. P. Rodriguez, N. Y. A. Shamma, A. T. Plumpton, D. Newcombe, and D. E. Crees, « Static and dynamic finite element modelling of thermal fatigue effects in insulated gate bipolar transistor modules », *Microelectronics Reliability*, vol. 40, pp. 455-463, 2000.
- [3] D-L. Blackburn, « Temperature Measurements of Semiconductor Devices – A Review », *20th Annual Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, pp. 70-80, 2004.
- [4] D.C. Katsis, J.D. Van Wyk, « Void-induced thermal impedance in power semiconductor modules: some transient temperature effects », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.39, no.5, pp. 1239- 1246, Sept/Oct 2003.
- [5] E-R. Motto, J-F. Donlon, « IGBT module with user accessible on-chip current and temperature sensors », *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1-6.
- [6] R. Schmidt, U. Scheuermann, “Using the chip as a temperature sensor - The influence of steep lateral temperature gradients on the $V_{ce}(T)$ -measurement”, *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009.
- [7] V. Smeth, “Aging and failure modes of IGBT power modules undergoing power cycling in high temperature environments”, *PhD Thesis, Montpellier 2 University, France*, 2010.
- [8] Y. Avenas, L. Dupont, Z. Khatir, “Temperature Measurement of Power Semiconductor Devices by Thermo-Sensitive Electrical Parameters - A Review”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no 6, pp. 3081-3092, 2012.
- [9] L. Dupont, Y. Avenas, P-O Jannin, « Comparison of junction temperature evaluations in a power IGBT module using an IR camera and three thermo-sensitive electrical parameters », *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, Issue 4, April 2013.